

## I-A 118

## 石材の材料定数と石造アーチの挙動解析

パシフィックコンサルタンツ（株） 正員 ○持田 拓児 熊本大学 正員 崎元 達郎  
（株）ピー・エス 正員 潮崎 宏治 熊本大学 学生員 岡崎 邦宏

1. まえがき：近年、石橋など現存する石造構造物が長年の風化、劣化の影響を受けていることまた、河川側の要請がある等の理由により、その保存が社会的な問題となっている。一方では、鹿児島県甲突五橋の1つである西田橋の調査でもアーチ部の変位が実験値と解析値で1桁合わないという問題も生じている。そこで本研究では、石材の材料定数を求め、この値を解析に取り込むことで石造アーチの挙動解析が妥当であることを、実験と解析により検証することを目的としている。解析法として剛体バネモデル<sup>1)</sup>（RBSM）を使用し、石と石の重心間にバネを導入することにより、個々の石材の挙動を表している。また、RBSMと比較する上で、有限要素バネモデル<sup>2)</sup>（FESM）でも解析を行った。ただし、実際に石橋に使用されている溶結凝灰岩の入手と加工が自在でないため、製作が容易で均質性があるモルタルブロックを用いることとし、圧縮試験、せん断試験及び模型サイズによるアーチ部荷重載荷試験を行って、理論解析値との比較検討を行った結果について報告する。

2. モルタルブロックによる試験：それぞれの試験において、お互いの接触面を実際の石橋に近づけるために表面をのみではつったもの（人工粗面）と、平らな表面のもの（平滑面）の2種類について試験を行い比較検討する。

1) 圧縮試験：図-1に示すように3種類の圧縮試験を行い、このときの角柱圧縮試験のEをヤング係数、平滑面、人工粗面のE'を変形係数とする。これより、平滑面、人工粗面の表面部垂直バネ定数k'nは次式で求められる。

$$k'n = \frac{EE'}{(E - E')Lt}$$

さらに重心間の垂直バネ定数K<sub>N</sub>は次式で求められる。

$$\therefore K_N = \frac{1}{\frac{L_c}{E} + \frac{1}{k'n}}$$

単位はE(kgf/cm<sup>2</sup>)、K<sub>N</sub>, K'n, K<sub>N</sub>(kgf/cm<sup>2</sup>/cm)である。

表-1 角柱単調  
載荷圧縮試験

| E      | K <sub>N</sub> |
|--------|----------------|
| 201000 | 12200          |

E：角柱のヤング係数  
E'：人工粗面の変形係数  
Lt：人工粗面圧縮試験の測定長

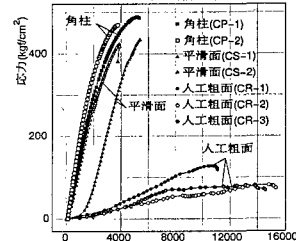


図-2 単調載荷応力-ひずみ曲線

表-2 単調載荷圧縮試験

|      | E'     | K'n   | K <sub>N</sub> |
|------|--------|-------|----------------|
| 平滑面  | 149000 | 38800 | 13200          |
| 人工粗面 | 13100  | 860   | 830            |

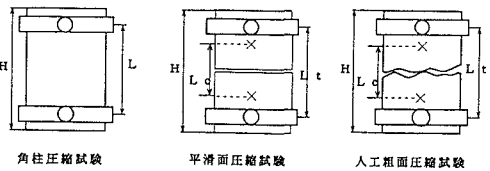


図-1 供試体寸法

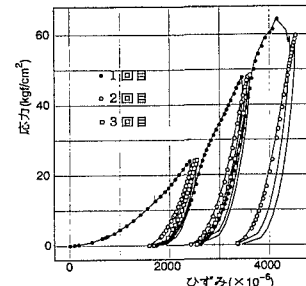


図-3 繰り返し載荷時の応力-ひずみ曲線

表-3 繰り返し載荷圧縮試験

|      | E'    | K'n  | K <sub>N</sub> |
|------|-------|------|----------------|
| 平滑面  | 68500 | 7630 | 5920           |
| 人工粗面 | 39000 | 3220 | 2840           |

単調載荷時の応力-ひずみ曲線を図-2に、繰り返し載荷時の応力-ひずみ曲線を図-3に、材料定数を表1～3に示す。

2) せん断試験：モルタルブロック間のせん断バネ定数を求めるために行った。その様子を図-4に示す。また、図-5のせん断応力-水平変位図の勾配よりせん断バネ定数K<sub>s</sub>をK<sub>s</sub>(平滑面)=1420, K<sub>s</sub>(人工粗面)=830kgf/cm<sup>2</sup>/cmと定めた。

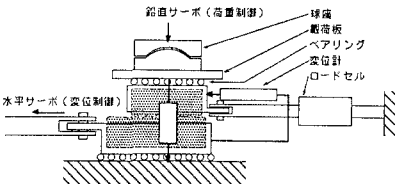


図-4 せん断試験装置模式図

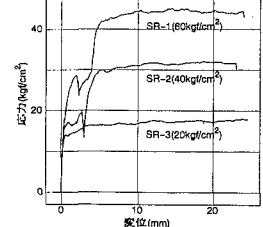
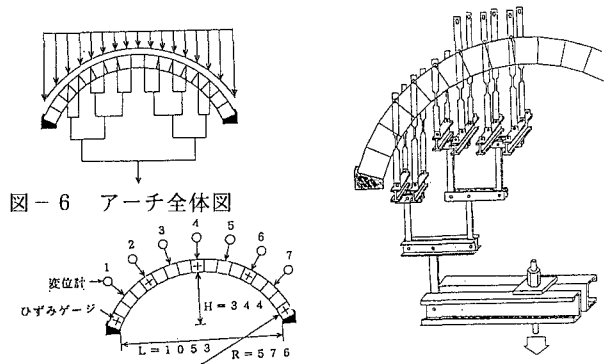


図-5 せん断応力-水平変位図

3)モルタルブロックによる模型載荷試験：  
図－6に示すセグメント数17個のアーチの模型を製作し、図－8に示すような装置により載荷する。載荷方法は、全体荷重を0～8tonまで載荷していき、これを同様に3回繰り返して、試験を行った。その際、図－7に示すように7点の求心方向の面内変位を変位計で測定し、軸力及びせん断方向のひずみをひずみゲージで測定した。



図－6 アーチ全体図

図－7 アーチ寸法と測定点

図－8 模型載荷試験模式図

3. 石橋の石材アーチ部の挙動解析と結果：模型載荷試験と同様のモデルでRBSMとFESMの2種類について解析を行い、実験で求めた定数やアーチの挙動を比較検討した。境界条件は両端を水平、鉛直方向に拘束し、

両端固定アーチと仮定して解析を行う。ここで、RBSMにおいては要素間のバネは垂直方向とせん断方向各1本ずつなので、石材の接触面積（断面積）を $A_c$ とすると、 $K_N' = K_N \cdot A_c$ 、 $k_s' = k_s \cdot A_c$ と表される。また、FESMでのバネ定数は下のよう求められる。

$$k_n' = \frac{k_n \cdot A_c}{N}, \quad k_s' = \frac{k_s \cdot A_c}{N}$$

ここで、 $N$ は石材間の接触バネ要素の本数を表す。後の計算では $N = 2$ とした。解析に用いた諸係数値を表－4に示す。表－5に示すように、単調載荷圧縮試験より求めた係数を用いた場合の解析結果は平滑面では実験値よりも小さく、人工粗面ではかなり大きな値を示した。それに対して表－6に示すように繰り返し載荷圧縮試験より求められた係数を用いた場合の解析結果は、平滑面と人工粗面のいずれも実験値に近い値を示した。このことより、繰り返し載荷圧縮試験より求められた係数を使用することで、解析値が実験値に対してよりよい対応を示すことがわかった。ま

※ $E'$ :kgf/cm<sup>2</sup>、 $K_n(K'n)$ ,  $K_s$ :kgf/cm<sup>2</sup>/cm

表－4 解析ケースの係数値

| ケース   | $E'$   | $K_N$   | $K_s$  |
|-------|--------|---------|--------|
| RBSM1 | 149000 | 1320000 | 142000 |
| RBSM2 | 68500  | 592000  | 142000 |
| RBSM3 | 13100  | 82500   | 83200  |
| RBSM4 | 39000  | 284000  | 83200  |
| ケース   | $E'$   | $k_n'$  | $k_s'$ |
| FESM1 | 149000 | 1940000 | 142000 |
| FESM2 | 68500  | 381000  | 142000 |
| FESM3 | 13100  | 43100   | 83200  |
| FESM4 | 39000  | 161000  | 83200  |

表－5 単調載荷の材料定数を使用した解析結果

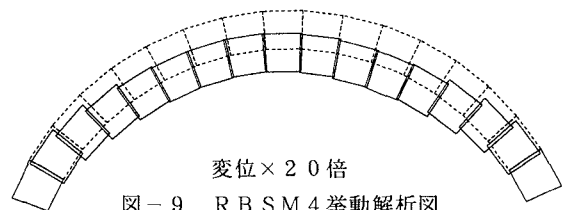
| 平<br>滑<br>面 | RBSM1              | FESM1              | 実験(1回)           |
|-------------|--------------------|--------------------|------------------|
|             | -0.222<br>(37.6%)  | -0.359<br>(60.8%)  | -0.590<br>(100%) |
| 粗<br>面      | RBSM3              | FESM3              | 実験(1回)           |
|             | -3.989<br>(362.6%) | -7.656<br>(696.0%) | -1.100<br>(100%) |

表－6 繰り返し載荷の材料定数を使用した解析結果

| 平<br>滑<br>面 | RBSM2              | FESM2              | 実験(3回)           |
|-------------|--------------------|--------------------|------------------|
|             | -0.531<br>(104.1%) | -1.100<br>(215.7%) | -0.510<br>(100%) |
| 粗<br>面      | RBSM4              | FESM4              | 実験(3回)           |
|             | -1.121<br>(151.5%) | -2.239<br>(302.6%) | -0.740<br>(100%) |

※値はアーチクラウン部の変位、単位はmm

※( )内は実験に対する比率を示している。



図－9 RBSM4 挙動解析図